

## III-123

## 脱水压密を考慮した凍結膨張の方向性について

(株)精研 正 上田保司 正 松岡啓次 正 伊豆田久雄

1. 緒言 凍結膨張による土圧や変位をより精度良く推定するためには、凍結膨張の方向性を考慮する方法がある。室内実験では、凍結膨張の方向性は、応力状態により決まること(三軸凍上特性<sup>1)</sup>)が分かっている。現地盤の凍土に作用する応力は、凍結膨張量だけでなく、脱水压密の度合によっても変化すると考えられる。脱水压密を考慮した凍結膨張の解析例としては、従来の一軸凍上についての差分解析法がある<sup>2)</sup>が、脱水压密と凍結膨張の方向性の関係を検討した例は無い。そこで、本報告では、LNG貯蔵タンクや凍結工法で見られる円筒状凍結を例にとって凍結膨張の方向性に与える脱水压密の影響について検討した。三軸凍上の実験式と圧密方程式とをカップリングした差分解析手法を示すとともに、モデル計算例により、軟弱及び硬質地盤での凍結膨張の方向性を述べる。

2. 解析方法 図1に示すように、凍結面前方の未凍結土側を脱水压密領域と弾性変形領域とに分割し、凍結面での凍結膨張量から未凍結土側の圧密収縮量を差し引いた変位量が自由吸排水面に現れ、凍結土圧が発生するものとする。

図2に解析の流れ図を示す。凍結に伴う水の流れが半径方向(熱流方向)にのみ起こるものとする、凍結面での吸水速度 $v_w$ は、次式で与えられる。

$$v_w = \frac{dw}{dt} = \frac{dw}{dr} \cdot \frac{dr}{dt} = \xi_w \cdot U$$

$$= \frac{U}{1+\Gamma} \{ \xi_1 + 2 \cdot \xi_3 - (\xi_\theta + n_f \Gamma) \} \quad (1)$$

$U$ は $r$ 方向への凍結進行速度、 $\xi_w$ は吸排水率を表す。 $\xi_\theta + n_f \Gamma$ は吸排水が無い場合の凍結膨張率、 $\Gamma$ は水の凍結膨張率である。 $\xi_1$ 、 $\xi_3$ はそれぞれ熱流方向及び熱流に直角方向の凍結膨張率であり、本モデルでは半径方向の凍結膨張率 $\xi_r$ が $\xi_1$ に、軸方向及び円周方向の凍結膨張率 $\xi_z$ 、 $\xi_\theta$ が $\xi_3$ に相当する。 $\xi_1$ 、 $\xi_3$ に関しては以下の実験式が成り立つ<sup>1)</sup>。

$$\xi_1 = a + \frac{b \cdot \sigma_1' + c}{\sigma_1'} \quad (2) \quad \xi_3 = d + \frac{e \cdot \sigma_3' + f}{\sigma_3'} \quad (3)$$

$\sigma_1'$ は熱流方向の有効応力、 $\sigma_3'$ は直角方向の有効応力、 $a \sim f$ は実験により求められる定数である。本モデルでは $\sigma_1'$ の初期値は図1に示す $\sigma_r$ であり、 $\sigma_3'$ の初期値は $\sigma_z$ と $\sigma_\theta$ との平均とした。吸水凍上に伴う凍結面での間隙水圧の低下により、 $\sigma_1'$ 、 $\sigma_3'$ は増加する。また $\sigma_1'$ は、半径方向に発生する凍結土圧 $\sigma_f$ によっても増加し、円周方向の有効応力 $\sigma_\theta$ が $\sigma_r$ により低下する為に $\sigma_3'$ は $\sigma_r/2$ だけ低下する。

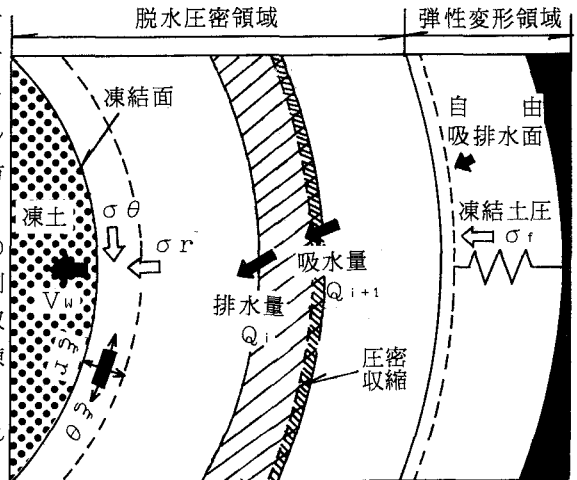


図1 円筒状凍結模式図

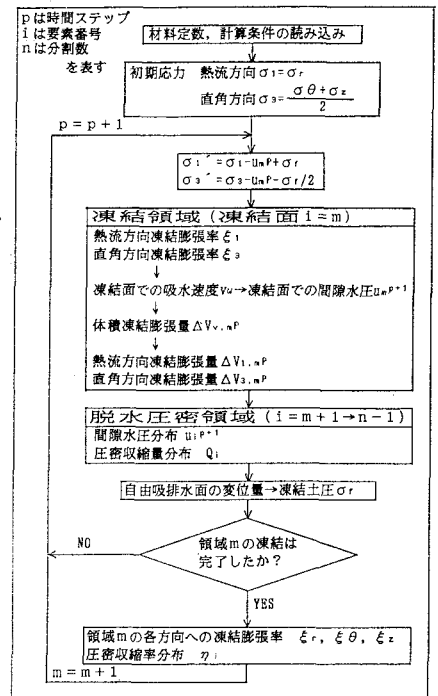


図2 解析の流れ図

図2にも示すように、(1)～(3)式で決まる $v_w$ ,  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_3$ により、各方向への凍結膨張量を計算出来る。

また、未凍結土側の脱水圧密は無限円筒での圧密方程式に従うものとし、例えば図

1の斜線部では、圧密収縮量は間隙水圧勾配からDarcyの法則により求められる吸水量 $Q_{i+1}$ と排水量 $Q_i$ との差とした。

### 3. 凍結膨張の方向性に

#### 及ぼす脱水圧密の影響

硬質地盤の代表として洪積層のシルトを、軟弱地盤の代表として沖積層のシルトを、現地地盤より採取した体積圧縮係数 $m_v$ 、透水係数 $k$ 、弾性係数 $E$ などの物性値は有効応力により変化するものとして、三軸凍上実験<sup>3)</sup>及び圧密試験等を行い、表1に示すように、各試料土について関数を決めた。前述の解析手法により過去の研究<sup>4)</sup>で扱われている直径40mmの円筒凍土のGL-20mでの地盤各方向の変位、

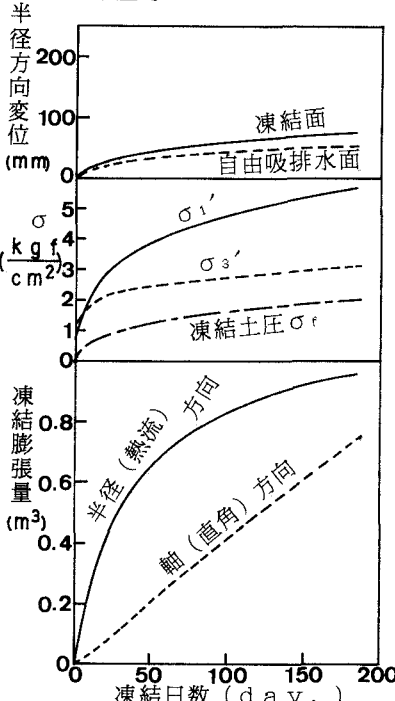


図3 変位、応力、凍結膨張量の経時変化(洪積シルト)

| 圧密特性   | 間隙比 $e$                   | 洪積シルト                                                   | 沖積シルト                                                  |
|--------|---------------------------|---------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
|        |                           | $0.924 - 0.09 \cdot \log_{10}(\sigma')$                 | $1.71 - 0.9 \cdot \log_{10}(\sigma')$                  |
| 力学特性   | 体積圧縮係数 $m_v$ (cm²/kgf)    | 0.0391                                                  | 0.391                                                  |
|        |                           | $(1.924 - 0.09 \cdot \log_{10}(\sigma')) \cdot \sigma'$ | $(2.710 - 0.9 \cdot \log_{10}(\sigma')) \cdot \sigma'$ |
| 凍結膨張特性 | 透水係数 $k$ (cm/sec)         | $3.52 \cdot 10^{-7} \cdot (\sigma')^{-1.131}$           | $2.08 \cdot 10^{-7} \cdot (\sigma')^{-1.563}$          |
|        |                           | 1630                                                    | 59.116                                                 |
|        | 弾性係数 $E$ (kgf/cm²)        | $-2.20 + 5.11 \cdot \sigma_3' + 7.69 \cdot \sigma_1'$   | $-9.57 + 5.22 \cdot \sigma_3' + 37.31 \cdot \sigma_1'$ |
|        |                           | $-4.10 + 2.40 \cdot \sigma_3' + 4.19 \cdot \sigma_1'$   | $-5.61 + 3.20 \cdot \sigma_3' + 5.62 \cdot \sigma_1'$  |
|        | 凍結膨張率 $\varepsilon_1$ (%) | 3.07                                                    | 2.77                                                   |
|        |                           |                                                         |                                                        |

表1 各試料土の物性値の関数

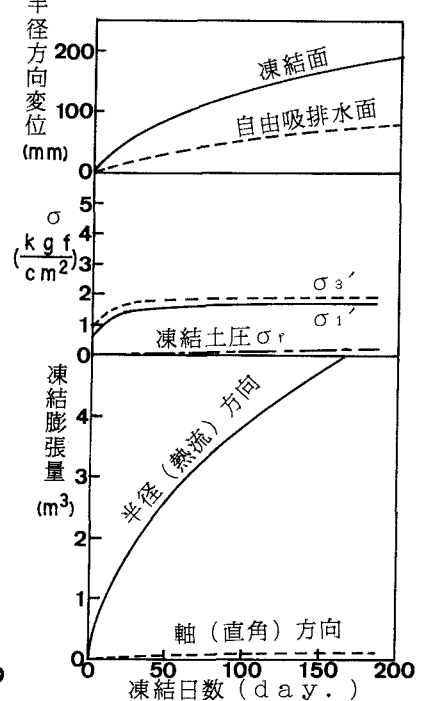


図4 変位、応力、凍結膨張量の経時変化(沖積シルト)

応力、凍結領域での凍結膨張量の経時変化を計算した。なお、自由吸排水面は冷却面から10mの位置とした。

図3に洪積シルトの計算結果を示す。脱水圧密の影響が少なく凍結面での変位の大半が自由吸排水面に現れ、弾性係数も沖積シルトの30倍程度大きい為に凍結土圧の増加が大きくなり、 $\sigma_3'$ に比べて $\sigma_1'$ の増加が顕著である。硬質地盤では、熱流方向の応力 $\sigma_1'$ の増加により、次第に熱流方向への凍結膨張は抑制されて、直角方向への凍結膨張量の全体に占める割合が大きくなり、等方膨張に近付くことが分かる。

一方、図4に示す沖積シルトの場合には、自由吸排水面での変位が未凍結土側の圧密収縮により凍結面よりかなり減少するので、凍結土圧の発生はごく僅かであり、 $\sigma_1'$ ,  $\sigma_3'$ は、間隙水圧の低下による増加がおこる凍結初期以後は緩やかにしか増加しない。この例からも分かるように、軟弱地盤では、脱水圧密の影響により凍結土圧の増加は少なく、凍結膨張量の経時変化に示すように、もともと凍結膨張しやすい熱流方向への凍結膨張量が多い。

### 4. まとめ

凍結膨張の方向性に及ぼす未凍土の脱水圧密の影響を調べる目的で差分析を行い、以下の結果を得た。1) 硬質地盤では凍結土圧の影響により熱流方向の応力が顕著に増加する為、次第に熱流方向への凍結膨張は抑制されて等方膨張に近付く。2) 軟弱地盤では脱水圧密の影響が大きい為に凍結土圧は小さく、熱流方向への凍結膨張が出やすい傾向にある。

文献:1)上田他(1991):土質講演集p1047-1048. 2)山本他(1989):雪氷Vol.51, No.4, p275-284. 3)上田他(1992):凍害対策と寒さの利用に関するシンポジウム, p103-108. 4)高志(1972):土木論文集Vol.200, p49-62.